

ESTUDIO DEL APROVECHAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE  
NANOPARTÍCULAS DE ORO DESDE LA MAGNETITA, EXTRAÍDA DE LA  
MINA DE ORO LA ESPERANZA

SEBASTIÁN NIETO SALAZAR

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PEREIRA - RISARALDA  
2019

ESTUDIO DEL APROVECHAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE  
NANOPARTÍCULAS DE ORO DESDE LA MAGNETITA, EXTRAÍDA DE LA  
MINA DE ORO LA ESPERANZA

SEBASTIÁN NIETO SALAZAR

Trabajo de investigación

Director

Dr. JOSÉ LUIS TRISTANCHO REYES

Docente Facultad de Ingeniería Mecánica  
Universidad Tecnológica de Pereira

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PEREIRA - RISARALDA  
2019

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi familia, compañeros y a todas aquellas personas que estuvieron a lo largo de mi proceso de formación integral y profesional.

Reconocimiento al Dr. José Luis Tristanco, director encargado del presente trabajo investigativo, por su acompañamiento en todo el proceso investigativo, asesoramiento técnico, su empatía con la propuesta investigativa, su entusiasmo por llevarla a cabo.

Se expresa el reconocimiento hacia el Dr. Carlos Alberto Ríos Reyes quien contribuyó generosamente al uso del Laboratorio de Microscopía del parque tecnológico ‘Guatiguará’ de la Universidad Industrial de Santander, como coordinador a cargo.

Agradecimientos a Carlos Alberto Villarreal Jaimes, Geólogo de la Universidad Industrial de Santander, quien brindó los servicios de la toma de pruebas en el equipo de Microscopio Electrónico de Barrido, como profesional Analista, del parque tecnológico ‘Guatiguará’ de la Universidad Industrial de Santander.

Reconocimiento al señor Victor Hugo Tamayo, actual dueño de la mina ‘La Esperanza’, quien aportó las diferentes muestras llevadas a ensayos y su interés por el aprovechamiento de los recursos desechados de su mina.

## CONTENIDO

### TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	4
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	5
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	6
<b>2. OBJETIVO</b> .....	7
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	7
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	7
<b>3. MARCO REFERENCIAL</b> .....	7
3.1 MARCO TEÓRICO .....	7
3.1.1 MINERÍA DE ALUVIÓN .....	7
3.1.2 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB).....	8
3.1.2.1 FUNCIONAMIENTO MEB.....	9
3.1.2.2 INTERACCIÓN DEL HAZ CON LA MUESTRA.....	9
<b>4. DISEÑO METODOLÓGICO</b> .....	11
4.1 MÉTODO DE LA UNIDAD DE ANÁLISIS.....	11
4.2 INSTRUMENTOS .....	16
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	18
5.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS SEM.....	18
5.2 DISCUSIÓN.....	27
5.2.1 MAGNETITA .....	27
5.2.2 PLATINO.....	29
5.2.3 ORO .....	31
5.2.4 NANOPARTÍCULAS DE ORO Y SUS APLICACIONES.....	6
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	33
<b>7. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	36

## **RESUMEN**

En la presente investigación se tomaron muestras de las arenas negras que se desechan de la mina 'La Esperanza' en Playa de Oro, Chocó, con el propósito de encontrar partículas de oro entre estos óxidos de Hierro. Posterior a la toma de datos, se procedió a caracterizar cada una de las dos muestras que se tomaron, usando el equipo de Microscopía Electrónica de Barrido, obteniendo datos muy interesantes, hallando en estos óxidos de hierro, partículas de oro y de Platino. Las partículas presentaron composiciones muy altas de cada metal precioso, por encima del 70% aproximadamente. Para el caso de la Magnetita, mayormente presente entre estas arenas negras, presentó Hierro por encima del 72% en peso total, lo que lleva a interesantes conclusiones para la venta industrial. Se realizó una búsqueda documentada de la minería en Colombia para comprobar la factibilidad de profundizar aún mas en el aprovechamiento mineral en esta zona del pacífico, encontrando que Playa de Oro, Chocó se encuentra en un punto estratégico tanto del oro como del Platino. Con una inversión en tecnología moderna, hay una interesante proyección de las partículas de oro halladas, para ser sintetizadas y posteriormente probadas como nanopartículas de oro en aplicaciones que se acerquen a la rama biomédica, para dar soluciones a tratamientos cancerígenos y fármacos.

## INTRODUCCIÓN

Día tras día en Playa de Oro, Chocó (mina La Esperanza), la minería del tipo aluvión, donde la modalidad de excavación es de forma vertical, llega al manto rocoso, donde se empieza a excavar de forma horizontal buscando material gravilloso, la gravilla rica en minerales es llevada a la superficie y mediante la técnica y uso de la batea se extraen aproximadamente 5g de oro diarios, dentro del proceso, como último paso, está la separación de magnetita del oro, la magnetita es totalmente desperdiciada, sin contar que contiene interesantes cantidades de oro en nanopartículas que bien pueden ser aprovechadas. El oro asociado con magnetita presenta mayormente una textura homogénea que va hasta tamaños de 200 nanómetros.

Actualmente los sistemas nanométricos más estudiados son aquellos que son compuestos por metales, semiconductores y materiales magnéticos, dentro de ellos está el oro dada su estabilidad, atractivas propiedades electrónicas, térmicas, ópticas, catalíticas y lo fáciles que son para ser funcionalizados con un amplio abanico de ligandos, ya sea para anticuerpos, polímeros, fármacos, etc <sup>[5]</sup> <sup>[2]</sup>. Por todo ello, las nanopartículas presentan un gran interés en el campo de la Biomedicina <sup>[2]</sup>. Es allí donde cobra sentido el aprovechamiento mineral, ya que las nanopartículas de oro tienen aplicaciones tanto para ser agentes de diagnóstico, como agentes terapéuticos, encontrando interesantes terapias, una de ellas, la destrucción de células tumorales, usando las nanopartículas de oro como un novedoso agente fototérmico, aplicación que ha permitido en los últimos años dar una alta eficiencia y precisión a los tratamientos oncológicos médicos, trascendiendo de la quimioterapia <sup>[8]</sup>.

Para caracterizar nanopartículas se utilizan diferentes técnicas de caracterización, una de las más completas e importantes es la Microscopía de Barrido de Electrones, o también llamada Microscopía Electrónica de Barrido (MEB); es una técnica de análisis superficial, que consiste en enfocar sobre una muestra un fino haz de electrones, acelerado con energías de excitación desde 0.1kV hasta 30kV y que permite obtener información

morfológica, topográfica y composicional de las muestras produciendo imágenes de alta resolución (de hasta 3 nm).<sup>[10]</sup>

Este proyecto se realizará en miras de medir la cantidad de nanopartículas de oro intrínsecas en el material desechado de magnetita, posteriormente caracterizar las nanopartículas encontradas en la magnetita para observar las posibilidades de una aplicación posterior, al área de la biomedicina, dejando datos y mediciones preliminares útiles para el reúso de la magnetita.

## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Colombia exporta un poco más de 50 toneladas de oro al año, y el 82% de este oro proviene de la minería de aluvión<sup>[9]</sup>. Generalmente el oro se encuentra en forma libre junto con las arenas negras, las cuales contienen magnetita en cierto porcentaje<sup>[7]</sup>. Con respecto a la magnetita, presente en gran cantidad en las arenas negras de río, es un óxido de hierro débilmente ferromagnético, y además uno de los óxidos más abundantes de la naturaleza<sup>[1]</sup>. Cantidades importantes y considerables de magnetita se pueden encontrar al finalizar los procesos de los yacimientos, llegando incluso a más del 40% en peso del material tratado para la obtención del oro<sup>[6]</sup>. Este porcentaje de magnetita es desperdiciado totalmente después de los ensayos al fuego que se realizan de manera artesanal, agravando la problemática ambiental y favoreciendo la continuidad del desaprovechamiento mineral.

Hoy día, las nanopartículas magnéticas se estudian como potencial instrumento en aplicaciones biomédicas, especialmente en tratamiento del cáncer, ya que presentan un extraordinario potencial como agentes fototerapéuticos en tratamientos oncológicos, así como para la elaboración de nanoestructuras útiles para el transporte y la vectorización selectiva de fármacos y terapia genética.<sup>[4]</sup> ¿Será entonces posible obtener pequeñas cantidades de nanopartículas de oro en la minería de aluvión con las características idóneas para su aplicación en el área de la Biomedicina?

## **2. OBJETIVO**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Este proyecto tiene como objetivo analizar el aprovechamiento del oro como pequeñas partículas y nanopartículas que se encuentran en la magnetita desechada en los procesos de obtención del oro en Playa Oro, Chocó.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- 2.2.1 Analizar la cantidad de partículas de oro presentes en las muestras de magnetita pertenecientes a la minería de aluvión en rangos de microescalas.
- 2.2.2 Caracterizar las partículas de oro por diferentes técnicas para obtener parámetros tales como el tamaño, distribución de tamaño, morfología y composición química.
- 2.2.3 Comparar las características anteriores con las propias de las nanopartículas empleadas en Biomedicina.

## **3. MARCO REFERENCIAL**

### **3.1 MARCO TEÓRICO**

#### **3.1.1 MINERÍA DE ALUVIÓN**

La minería de este tipo, en Playa de Oro, Chocó, se inicia con estudios en los yacimientos donde posiblemente hay oro, es de recordar que el término ‘Aluvión’, pertenece a la definición de sedimentos que quedaron depositados en un terreno y que está compuesto de arena, grava, arcilla, etc.



Se inicia entonces con un equipo llamado ‘Magnetómetro’, el cual indica la presencia de ‘Magnetita’, este mineral es un óxido de hierro que muchas veces es un indicador preliminar de que hay una posible presencia de Oro. Seguidamente, con un Geo-radar terrestre, se mide la profundidad aproximada de este mineral. El próximo paso es empezar con una modalidad de excavación de tipo vertical en terreno firme, en el cual las paredes se refuerzan con madera hasta llegar al manto rocoso o ‘peña’. De allí en adelante comienza la excavación de forma horizontal buscando material gravilloso. La gravilla rica en minerales se extrae a la superficie y se clasifica en una placa metálica puesta en un cajón de madera; se separa la gravilla y las arenas salen por gravedad. Con el paso constante del agua y dentro de la placa, queda la magnetita, lo demás, desechos como arenas y piedras, salen del cajón. Después, se levanta la placa, se recoge todo lo atrapado, y, con una batea, se comienza a desechar más arena hasta quedar el oro en presencia de ‘Magnetita’. En una ‘cacerola’ a alta temperatura, se agrega la magnetita para darle un secado a la humedad que ha tenido por el contacto con el agua y, por último, en un proceso de imantación, se recoge de manera artesanal el polvo del óxido de hierro y queda finalmente el oro separado de la magnetita. Este último, es desechado al igual que fueron rocas y arenas.

### **3.1.2 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)**

La microscopía de barrido de electrones (MEB) es una técnica de análisis superficial, que consiste en enfocar sobre una muestra electrodensa (opaca a los electrones) un fino haz de electrones acelerado con energías de excitación desde 0.1kV hasta 30kV.

El haz de electrones se desplaza sobre la superficie de la muestra realizando un barrido que obedece a una trayectoria de líneas paralelas. La interacción del haz de electrones con la muestra produce diversas señales (electrones secundarios, electrones retrodispersados, emisión de rayos X, etc.), que son recogidas por distintos detectores; los cuales permiten la observación, caracterización y microanálisis superficial de materiales tanto orgánicos como inorgánicos. <sup>[10]</sup>

### 3.1.2.1 FUNCIONAMIENTO MEB

Un microscopio de barrido de electrones funciona con un haz de electrones producido por una fuente que puede ser un cañón termoiónico (*filamento de tungsteno o de hexaboruro de lantano*) o un cañón de emisión de campo FEG, de las siglas en inglés Field Emission Gun.

Al cañón se le aplica un potencial eléctrico que acelera el haz de electrones hacia una columna, éste es focalizado por medio de lentes electromagnéticas sobre la muestra (toda la trayectoria de los electrones debe estar en vacío, de lo contrario, los electrones colisionarían con las moléculas de aire y serán absorbidos). Los electrones chocan e interactúan con la muestra produciendo varias señales que podrán ser recogidas de acuerdo con la señal y con los detectores presentes. La magnificación de la imagen se produce por un conjunto de lentes electromagnéticas que mediante un tratamiento adecuado de las señales electrónicas son proyectadas en un tubo de rayos catódicos (CRT). <sup>[10]</sup>

### 3.1.2.2 INTERACCIÓN DEL HAZ CON LA MUESTRA

Cuando los electrones colisionan con la muestra se producen varios fenómenos:

Figura 1. Interacción electrones-muestra

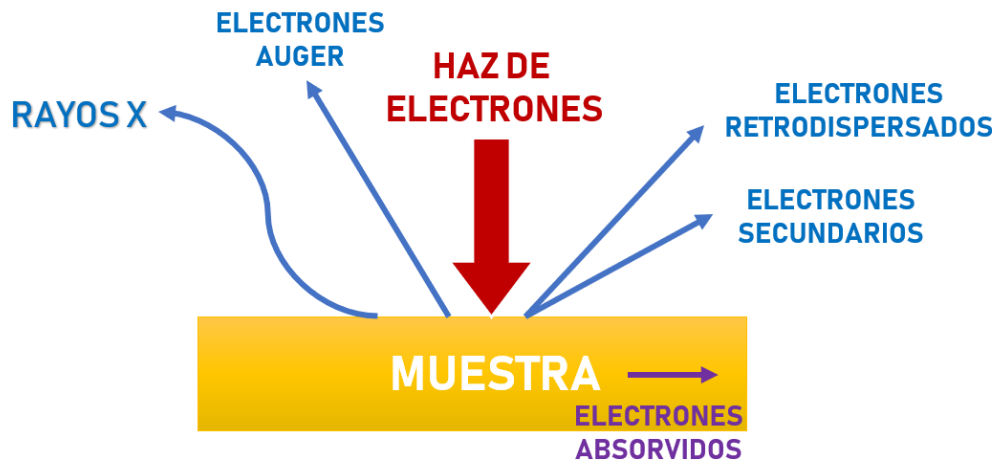


Figura: Autor

#### **3.1.2.2.1 ELECTRONES SECUNDARIOS**

La propia muestra emite electrones secundarios debido a la colisión con el haz incidente para generar imágenes tridimensionales de alta resolución SEI (Secondary Electron Image), la energía de estos electrones es muy baja, inferior a 50 eV, por lo que los electrones secundarios provienen de los primeros nanómetros de la superficie. <sup>[10]</sup>

#### **3.1.2.2.2 ELECTRONES RETRODISPERSADOS**

Algunos electrones primarios son reflejados o retrodispersados tras interactuar con los átomos de la muestra. La intensidad de emisión de estos electrones está directamente relacionada con el número atómico medio de los átomos de la muestra ( $Z$  promedio), así los átomos más pesados producen mayor cantidad de electrones retrodispersados, permitiendo la obtención de imágenes planas de composición y topografía de la superficie. <sup>[10]</sup>

#### **3.1.2.2.3 ABSORCIÓN DE ELECTRONES**

La muestra absorbe electrones en función del espesor y la composición; esto produce la diferencia de contraste en la imagen. <sup>[10]</sup>

#### **3.1.2.2.4 EMISIÓN DE RAYOS X**

Cuando los electrones de niveles internos son expulsados por la interacción de los electrones primarios, habrá transiciones entre los niveles de energía con emisión de rayos X, esta energía y longitud de onda están relacionadas con la composición elemental del espécimen, permitiendo realizar análisis químicos mediante espectroscopía por dispersión de energía y de longitud de onda (EDS y WDS). <sup>[10]</sup>

### **3.1.2.2.5 EMISIÓN DE ELECTRONES AUGER**

Cuando un electrón es expulsado de un átomo, otro electrón más externo puede saltar hacia el interior para llenar esta vacancia resultando en un exceso de energía. Esta energía extra puede ser liberada emitiendo un nuevo electrón de la capa más externa (electrón Auger). Son utilizados para obtener información sobre la composición de pequeñísimas partes de la superficie de la muestra.

Todas estas señales están relacionadas entre sí y dependen en gran medida de la topografía, el número atómico y el estado químico de la muestra; por lo tanto, un microscopio de barrido de electrones suministra información morfológica, topográfica y composicional de las superficies de las muestras <sup>[10]</sup>

## **4. DISEÑO METODOLÓGICO**

### **4.1 MÉTODO DE LA UNIDAD DE ANÁLISIS**

El método por seguir se dio de la siguiente forma:

#### **4.1.1 Extracción de las muestras de Magnetita**

Al llegar al último paso de la obtención del oro descrita en el numeral **4.1.1**, se tomaron de manera ordenada, dos muestras del material sobrante, para el caso de interés, el óxido de hierro o Magnetita. Se enumeraron como:

- Muestra 1: De un color oscuro, de pocas impurezas y mejor tratada.
- Muestra 2: De color marrón oscuro, con gránulos de rocas e impurezas notables.

Ambas muestras se encontraban en polvo.

#### **4.1.2 Análisis por medio del equipo de Microscopía Electrónica de Barrido**

Se procedió a analizar las 2 muestras tomadas, con el equipo SEM. La idea de este análisis es obtener por medio de los electrones secundarios, información morfológica de la superficie, tamaños aproximados de las partículas, y, por medio de los electrones restrodispersados, información química de los elementos que componen las partículas.

##### **4.1.2.1 Preparación de las muestras en polvo**

Se riega parte de la muestra, utilizando una espátula (*Figura 4*)., en una porción de cinta de carbono que previamente es adherida sobre unos stub metálicos (*Figura 2*).

*Figura 3. Cinta sobre stub metálicos*

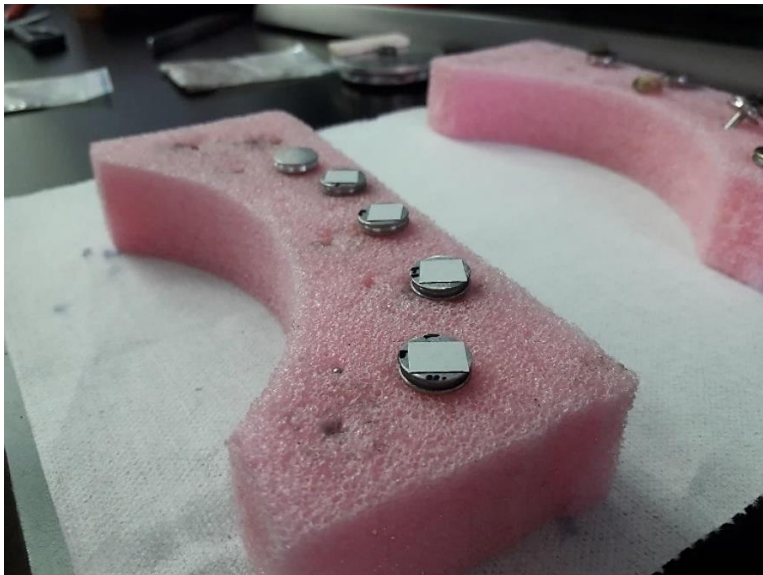


Figura: Autor

*Figura 4. Espátula para regar la muestra en la cinta de carbono.*

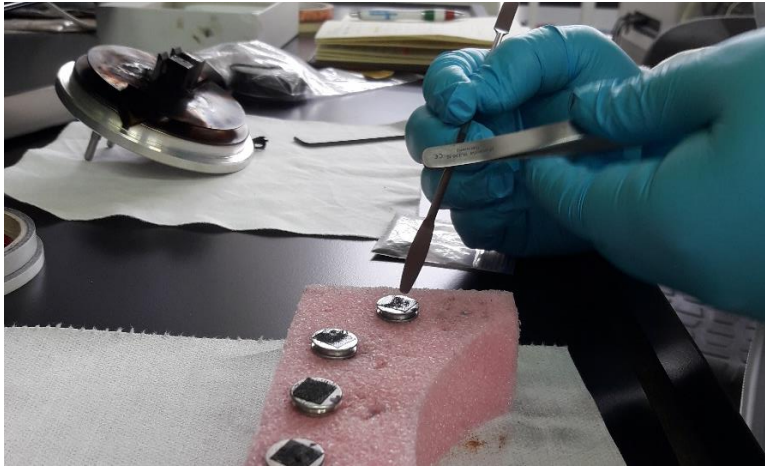
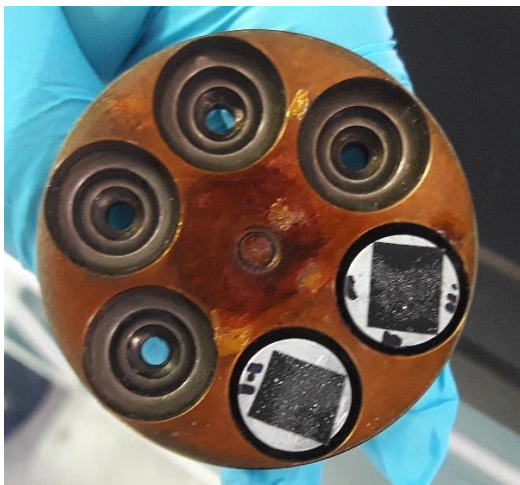


Figura: Autor

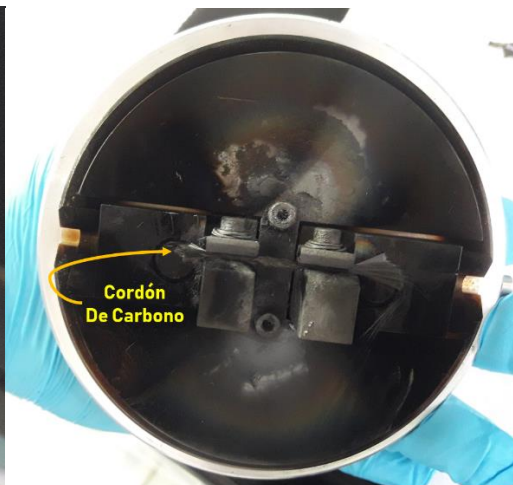
De las muestras, 2 se recubrieron con carbono (*Figura 5*), dos se dejaron sin recubrimientos, esto dado que se quiso probar si con una película conductora, daban mejores resultados, sin embargo, los recubrimientos se hacen en caso de que la muestra en polvo no sea metálica. Para el caso, nuevamente, se tenía un óxido de hierro.

En un porta muestras, se colocan los stub que serán recubiertos de carbono (*Figura 5*), un cordón de carbono es puesto en un tambor que posteriormente será instalado en un equipo de recubrimientos o vaporizador (*Figura 6*). El equipo pasa corriente a través del cordón, y todo el vapor generado, cae sobre la muestra.

*Figura 5. Porta muestras*



*Figura 6. Tambor con el cordón de Carbono*



*Figura: Autor*

*Figura 7. Equipo recubriendo las muestras*



*Figura: Autor*

#### 4.1.2.2 Pruebas en el equipo SEM

De las 2 muestras que se tenían, se subdividieron en 2 más, por ende, de las 4 muestras finales, se prepararon 2 con recubrimiento de carbono y 2 sin recubrimiento. En el proceso descrito en el numeral anterior, finalmente se retiraron las muestras y se recolectaron nuevamente en otro porta muestras, esta vez, uno que pertenece al equipo de SEM.

*Figura 8. Porta muestras con las 4 muestras, 2 con recubrimiento, 2 sin recubrimiento.*

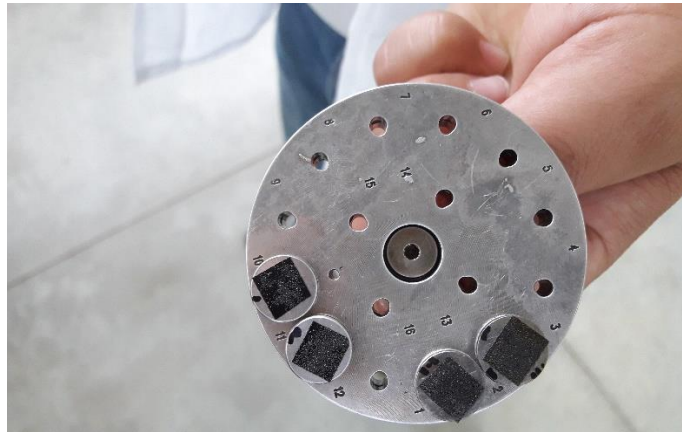


Figura: Autor

El porta muestras es puesto dentro del equipo SEM.

*Figura 9. Porta muestras dentro del equipo SEM.*



Figura: Autor



## 4.2 INSTRUMENTOS

- **RECUBRIDOR:**

Quorum Q150R ES, Metalizador/Evaporador de carbón con bomba rotatoria.

Sistema combinado de metalización y evaporación de carbón. El sistema de deposición puede cambiarse en segundos y el sistema “inteligente” reconoce automáticamente qué cabezal se ha colocado, las opciones de operación adecuadas al mismo.

*Equipo 1. Recubridor Quorum Q150R ES*



Figura: Autor

- **MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO**

**Características del equipo:**

***Imágenes:***

Microscopio Electrónico de Barrido FEG (Field Emission Gun) QUANTA FEG 650

Las imágenes fueron tomadas con las siguientes características:

- Alto vacío
- voltaje de aceleración 30 KV
- Detector para imágenes:
  1. Electrones secundarios (SE): Everhart Thornley detector ETD (para observar Morfología)
  2. Electrones retrodispersados (BSE): Back scattered electrón detector (BSED) tipo SSD (para observar variaciones de composición).

***Para Análisis Químico:*** voltaje de aceleración 30 KV

Detector EDAX APOLO X resolución de 126.1 Ev (en. Mn  $K\alpha$ ) para realizar análisis EDS (Energy-Dispersive Spectroscopy). Software EDX Genesis. Información semi-cuantitativa de los elementos químicos.

*Equipo 2. Microscopio Electrónico de Barrido Quanta FEG 650*



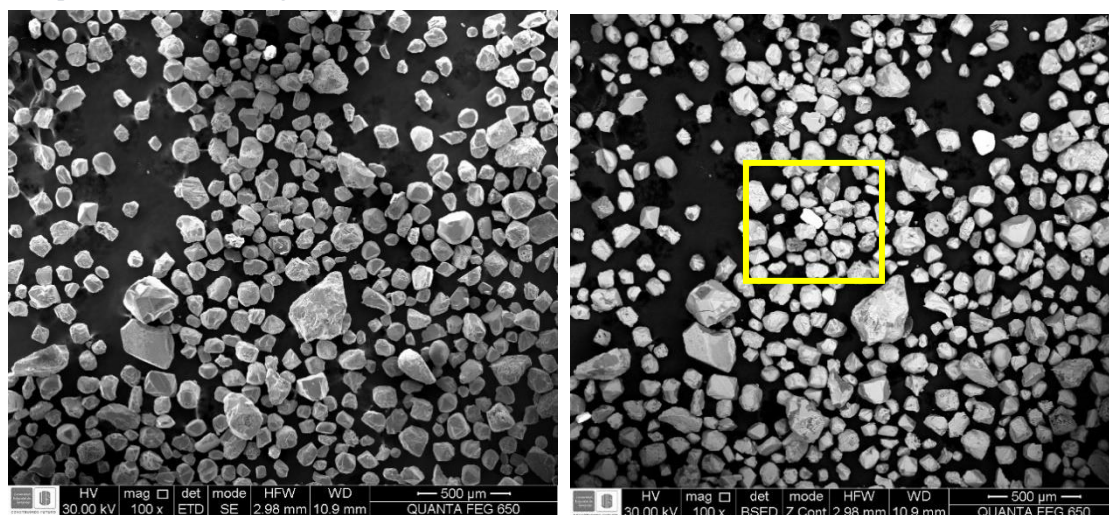
Figura: Autor

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS SEM

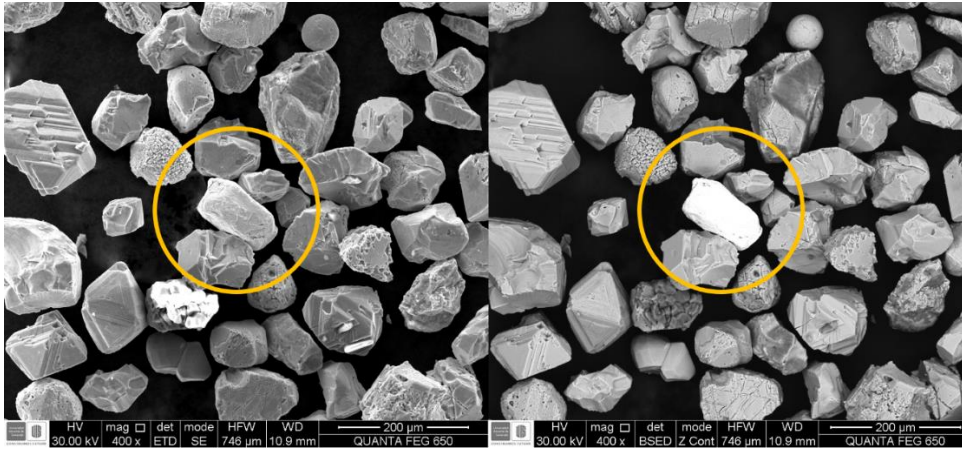
Se comenzó a analizar la muestra número 1 desde el Software EDX Genesis, utilizando las imágenes del detector tanto para electrones secundarios (para observar morfología) como para electrones retrodispersados (para observar variaciones de composición). El interés estaba situado en encontrar partículas de oro en las muestras de Magnetita, por lo que detenidamente se observaron las imágenes de electrones retrodispersados para encontrar partículas más brillantes, que iban a indicar una posible partícula con composición de un número atómico mayor que las partículas que fueran, en ese orden de ideas, más opacas. El oro, por ejemplo, posee un número atómico de 79, mientras que el Hierro (abundante en las muestras tomadas), posee un número atómico de 26. Inicialmente, ese fue el criterio de búsqueda y arrojó los siguientes resultados:

*Figura 10. Muestra 1-100x. Izquierda: Morfología de la imagen; Derecha: Variaciones de composición de la imagen.*



Al observar la partícula con mayor intensidad de brillo, se le dio un aumento mayor:

Figura 11. Partícula 1. Muestra 1-400x. Izquierda: Morfología de la imagen; Derecha: Variaciones de composición de la imagen.



La composición química para la imagen, en el punto seleccionado a continuación, es la siguiente:

Figura 12. Punto 1 de evaluación de la composición.

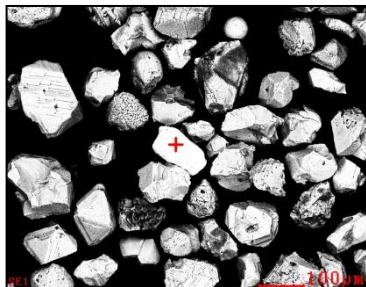


Tabla 1. Composición química, partícula 1, muestra 1.

Element	Wt%	At%
CK	02.11	12.11
OK	10.05	43.34
AlK	00.82	02.09
SiK	01.09	02.67
FeK	10.65	13.16
PtL	75.29	26.63
Matrix	Correction	ZAF

La tabla anterior, demuestra que la partícula señalada tiene una alta composición en peso de Platino con un 75,29%, siguiéndole en ese orden de composición el Hierro y el Oxígeno.

Descartando la partícula anterior, de la misma forma se tomaron otros puntos, arrojando los siguientes datos:

Figura 13. Punto 2 de evaluación de la composición.

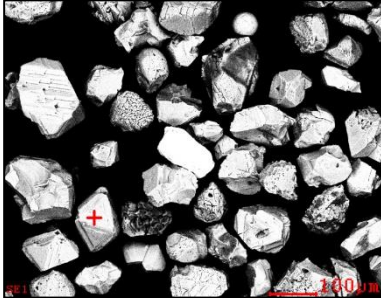


Tabla 2. Composición química, partícula 2, muestra 1.

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>OK</i>	21.18	48.40
<i>FeK</i>	78.82	51.60
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Figura 14. Punto 3 de evaluación de la composición.

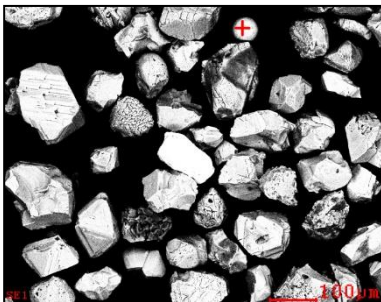


Tabla 3. Composición química, partícula 3, muestra 1.

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>OK</i>	23.10	51.18
<i>MnK</i>	01.04	00.67
<i>FeK</i>	75.86	48.15
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

El recuadro (imagen) que se estaba analizando en el Software, arrojaba partículas de Hierro, datos que se esperaban encontrar en su mayoría, tal y como estaba sucediendo, sin embargo, se decidió cambiar de zona de prueba en la muestra, ya que el objetivo era encontrar oro particulado, se obtuvieron resultados cercanos, pero estaban lejos de la resolución que tenía el equipo. Una muestra de ello fue haber encontrado rastros de composición de oro a muy bajo porcentaje de peso, en las siguientes partículas:



Figura 15. Partícula 4. Muestra 1-4000x. Izquierda: Morfología de la imagen; Derecha: Variaciones de composición de la imagen.

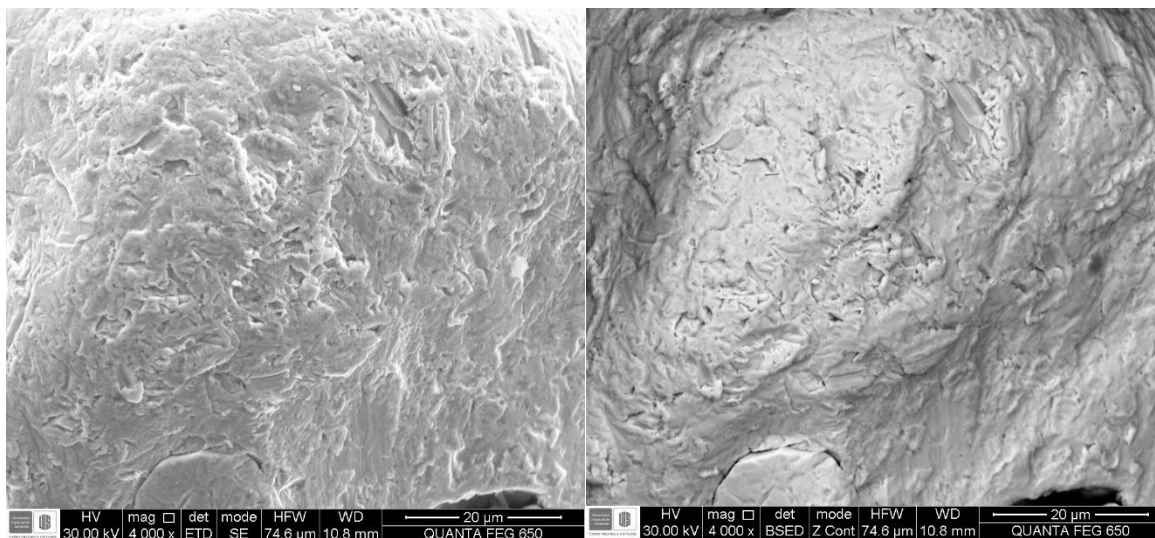


Figura 16. Punto 4 de evaluación de la composición.

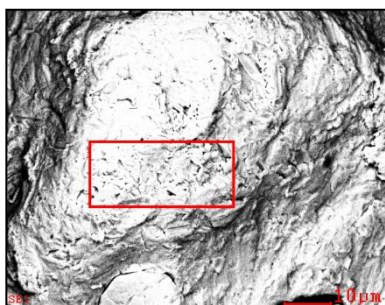


Tabla 4 Composición química, partícula 4, muestra 1.

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	03.07	23.62
<i>OK</i>	03.16	18.26
<i>FeK</i>	11.63	19.24
<i>PtL</i>	80.54	38.13
<i>AuL</i>	01.60	00.75
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Figura 17. Partícula 5. Muestra 1-5000x. Izquierda: Morfología de la imagen; Derecha: Variaciones de composición de la imagen.

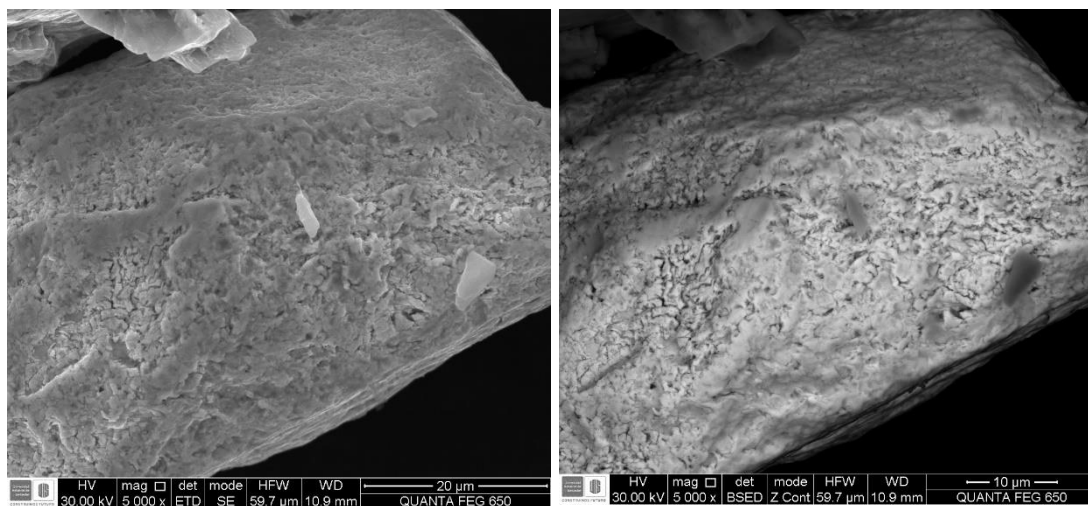


Figura 18. Punto 5 de evaluación de la composición.

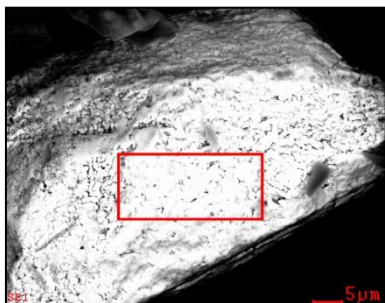


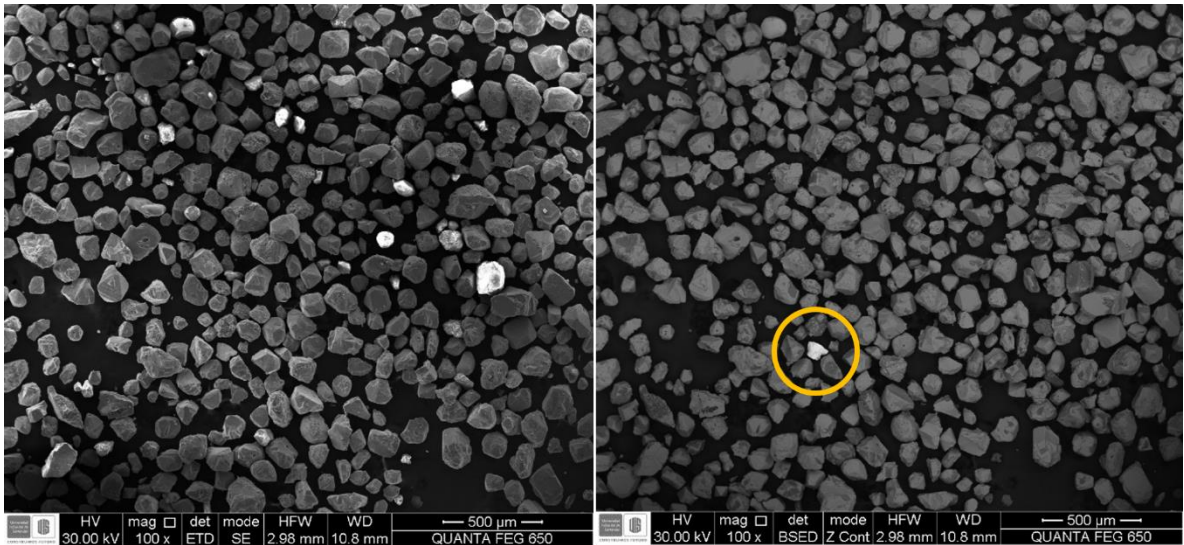
Tabla 5 Composición química, partícula 5, muestra 1

Element	Wt%	At%
OK	05.59	31.21
AsL	01.92	02.29
BaL	01.76	01.14
FeK	15.67	25.06
CuK	06.27	08.82
PtL	67.19	30.75
AuL	01.59	00.72
Matrix	Correction	ZAF

Porcentajes muy bajos de oro se pueden observar en la composición en peso de las últimas partículas evaluadas en el Software, por el tipo de resolución, se hacía un poco más difícil de analizar a profundidad si lo que se tenían en esas partículas compuestas mayormente de Platino, eran también nanopartículas de oro.

A continuación, la evaluación de la muestra número 2 y sus resultados.

*Figura 19. Partícula 1. Muestra 2-100x. Izquierda: Morfología de la imagen; Derecha: Variaciones de composición de la imagen.*



De la *Figura 17*, el detector de imágenes de electrones retrodispersados, arrojó para la toma, una partícula con un brillo único para entre las demás partículas. Al analizar más de cerca la partícula señalada y ecerrada por el círculo amarillo, se obtuvieron los siguientes resultados:

*Figura 20. Partícula 1. Muestra 2-400x. Izquierda: Morfología de la imagen; Derecha: Variaciones de composición de la imagen.*

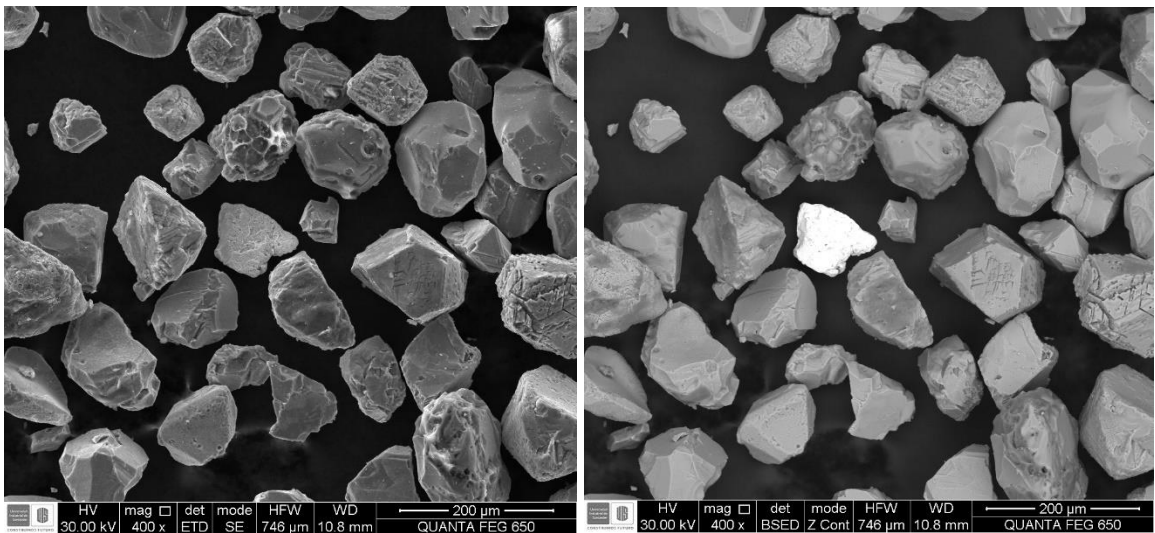




Figura 21. Punto 1 de evaluación de la composición.

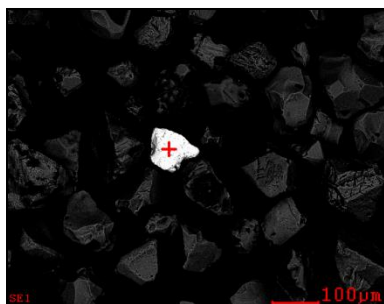


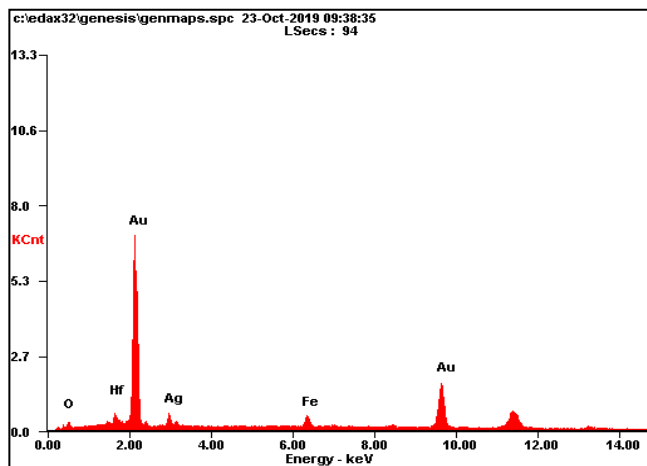
Tabla 6. Composición química, partícula 1, muestra 2

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>OK</i>	04.63	33.64
<i>HfM</i>	00.00	00.00
<i>AgL</i>	09.30	10.03
<i>FeK</i>	03.69	07.69
<i>AuL</i>	82.38	48.64
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

La partícula señalada, satisfactoriamente, se compone de oro con un porcentaje en peso de 82.38% y pequeñas composiciones de Plata y Hierro. Esto confirma que las muestras de los óxidos de Hierro efectivamente tienen presencia de partículas de oro.

Gráfica 1. Partícula 1. Espectro SEM-EDS de partículas de Oro.

Intensidad contra Energía. energía en kilo electrón-Voltio.



La Gráfica 1 muestra en el espectro de la microscopía electrónica de barrido, picos de alta intensidad para oro y picos menos pronunciados para plata y hierro.

Dados los buenos resultados de la muestra 2, se intentó tomar otro punto para verificar que la presencia del oro en la magnetita era más que sólo una partícula flotante entre las cientos de Hierro que albergaban la muestra.

Figura 22. Partícula 2. Muestra 2-3000x. Izquierda: Morfología de la imagen; Derecha: Variaciones de composición de la imagen.

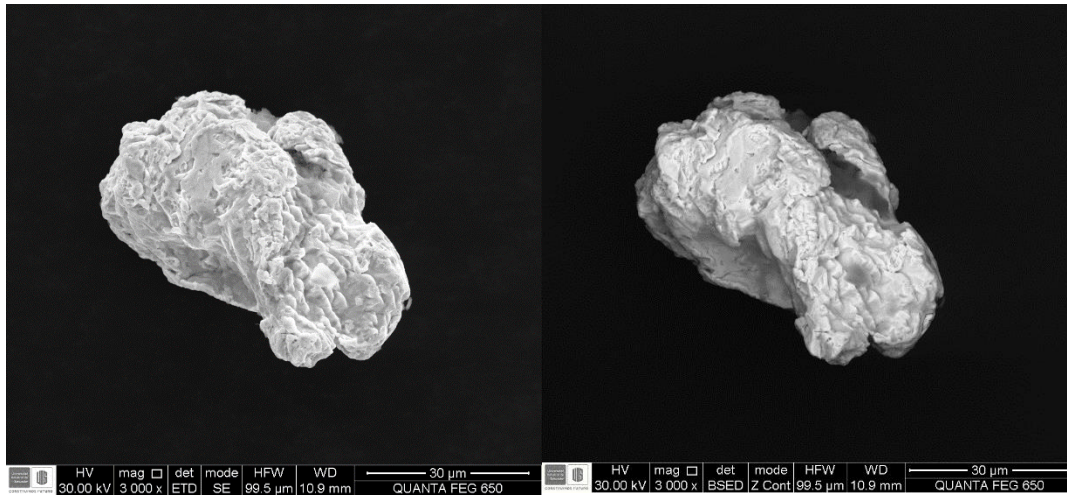


Figura 23. Punto 1 de evaluación de la composición.

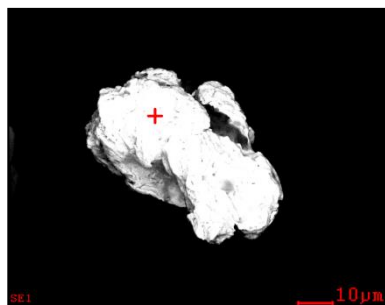
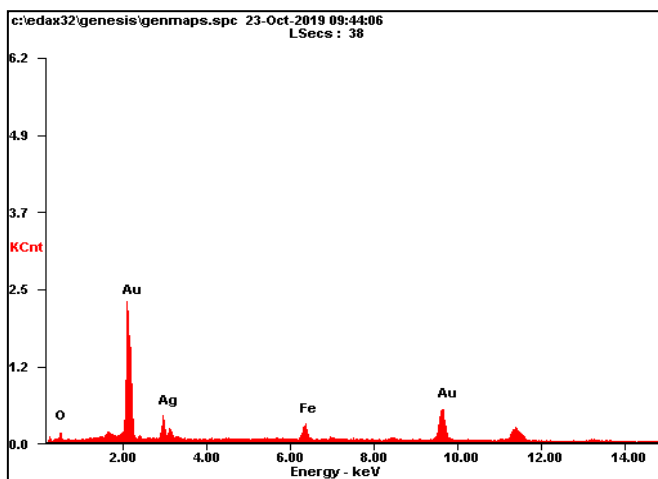


Tabla 7 Composición química, partícula 2, muestra 2

Element	Wt%	At%
OK	07.08	41.72
AgL	17.20	15.04
FeK	05.76	09.73
AuL	69.96	33.50
Matrix	Correction	ZAF

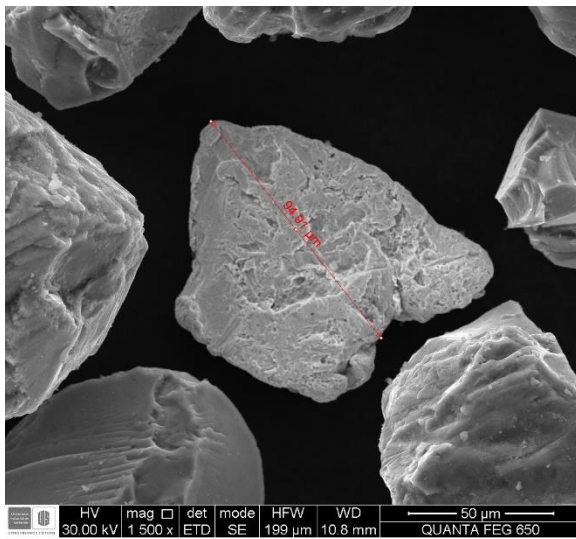
Gráfica 2. Partícula 2. Espectro SEM-EDS de partículas de Oro. Intensidad contra Energía, energía en kilo electrón-Voltio.



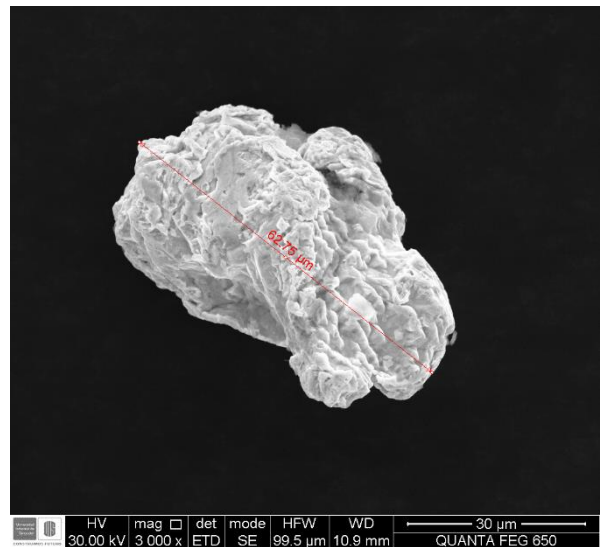
Para la segunda partícula analizada *Figura 22*, de la muestra 2, el software arrojó picos altos de presencia de oro, *Gráfica 2*. Con una composición en porcentaje de peso en oro de 69.96% en el punto analizado.

El tamaño de ambas partículas se calculó de manera aproximada con herramientas de medición escaladas que posee el Software, de la forma:

*Figura 24. Partícula 1. Muestra 2-1500x. Morfología de la imagen*



*Figura 25. Partícula 2. Muestra 2-3000x. Morfología de la imagen*



Tamaño aproximado de partícula:

**Partícula 1:** 94,91µm

**Partícula 2:** 62,75µm

## 5.2 DISCUSIÓN

Los resultados de las muestras tienen aplicaciones muy interesantes, dentro de las que se puede destacar un importante análisis en las arenas negras de la minería de aluvión ubicada en Playa de Oro, Chocó. Para la industria del Hierro, Platino y para el caso investigativo, el más interesante, Oro, hay innumerables aprovechamientos, a continuación, un análisis del aprovechamiento de las partículas halladas.

### 5.2.1 MAGNETITA

Es un mineral de hierro, forma parte de un grupo de minerales llamados óxidos; usualmente la magnetita puede ser identificada a causa de su gran magnetismo, y por su color oscuro.

Es un mineral muy denso, frágil, duro y con propiedades ferromagnéticas, es capaz de atraer al hierro y al acero junto con otros metales. Su color es pardo negruzco, con brillo metálico.

Todo campo magnético es consecuencia de un flujo de electrones en la magnetita su fuerte magnetismo se debe a un fenómeno de ferrimagnetismo: los momentos magnéticos de los distintos cationes de hierro del sistema se encuentran fuertemente acoplados, por interacciones antiferromagnéticas, pero de forma que en cada celda unidad resulta un momento magnético no compensado. La suma de estos momentos magnéticos no compensados, fuertemente acoplados entre sí, es la responsable de que la magnetita sea un imán. [11]

Para la Industria del hierro, el requerimiento más atractivo como interés económico, la Magnetita debe tener una composición mínima de Hierro del 72%. [6]

Las partículas evaluadas presentaron una composición de:

- **Muestra 1:**

**Partícula 2 (Figura 13):**

**Fe:** 78,82% - **O:** 21,18%

### Partícula 3 (Figura 14):

**Fe:** 75,86% - **O:** 23,10%

Como complemento a las partículas anteriores, un anexo de una partícula evaluada en el mismo marco de micrografía se presentará a continuación:

Figura 26. Punto 6 de evaluación de la composición.

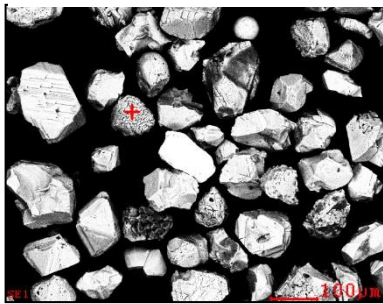


Tabla 8. Composición química, partícula 6, muestra 1.

Element	Wt%	At%
OK	21.62	47.88
AlK	02.65	03.48
SiK	00.94	01.19
MnK	01.54	00.99
FeK	73.24	46.46
Matrix	Correction	ZAF

### Partícula 6 (Figura 26):

**Fe:** 73,24% - **O:** 21,62%

Para lo anterior, todas las partículas de Hierro, de ambas muestras, presentan composiciones idóneas para el aprovechamiento de la Magnetita, su composición es cercana o incluso supera el porcentaje en peso mínimo que se requiere para el uso en la industria.

Como aplicaciones de la Magnetita se tiene:

- En las calderas (industrias): la magnetita es un compuesto muy estable a altas temperaturas, aunque a bajas temperaturas o en presencia de aire húmedo a temperatura ambiente se oxide lentamente y forme óxido férrico. Su gran estabilidad a altas temperaturas hace que sea un buen protector del interior de los tubos de la caldera. Es por ello por lo que se hacen tratamientos químicos en las calderas industriales que persiguen formar en el interior de los tubos capas continuas de magnetita. [11]
- En la construcción: se usa como añadido natural de alta densidad (4,65 hasta 4,80 kg/l) en hormigones, especialmente para protección radiológica. [11]

- Hay investigaciones muy interesantes acerca del uso de la magnetita en fluidos, haciendo de ellos junto con composiciones de Magnetita, fluidos magneto-reológicos, cuyas propiedades varían considerablemente en presencia de un estímulo externo. También son conocidos como materiales inteligentes. [7]

### **5.2.2 PLATINO**

La mayor parte del platino en Colombia proviene de depósitos aluviales ubicados en la costa del Pacífico colombiano, donde las comunidades afroamericanas extraen el metal utilizando métodos tradicionales. La producción para 2014 fue de 1.134,65 kg.

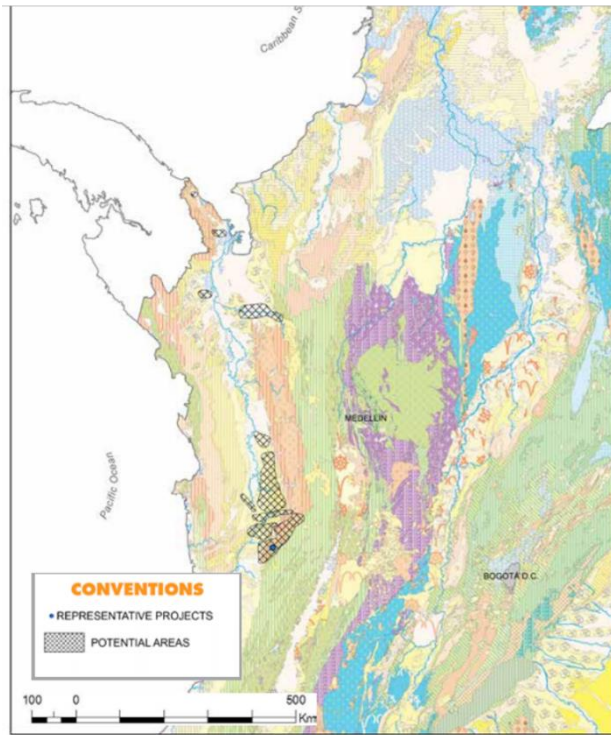
El platino extraído en Colombia se concentra principalmente en los afluentes de los ríos San Juan, Atrato y Condoto. Aunque la fuente principal de platino aún se desconoce en el país, en 1992, se llevaron a cabo estudios geológicos y propuso el Complejo Zonal Ultramáfico (rocas ígneas con muy bajo sílice) en el Alto Condoto (aprox. 20 Ma de edad), como fuente primaria de este metal. Actualmente, las empresas privadas están explorando el terreno.

La cuenca del Atrato-San Juan, tiene una muy alta geología potencial para la exploración de platino. Existen numerosas fuentes secundarias de platino y oro dentro de la región, aunque las principales fuentes de este metal no se han descubierto, se supone que hay Varios complejos de zonas ultramáficas en la zona. [12]

Según el Mapa Geológico Colombiano de Zonas Potenciales para el año 2011 (Obtención de Platino), las áreas y proyectos representativos para la extracción del Platino, coincide con la zona de la mina ‘La Esperanza’ en Playa de Oro, Chocó:

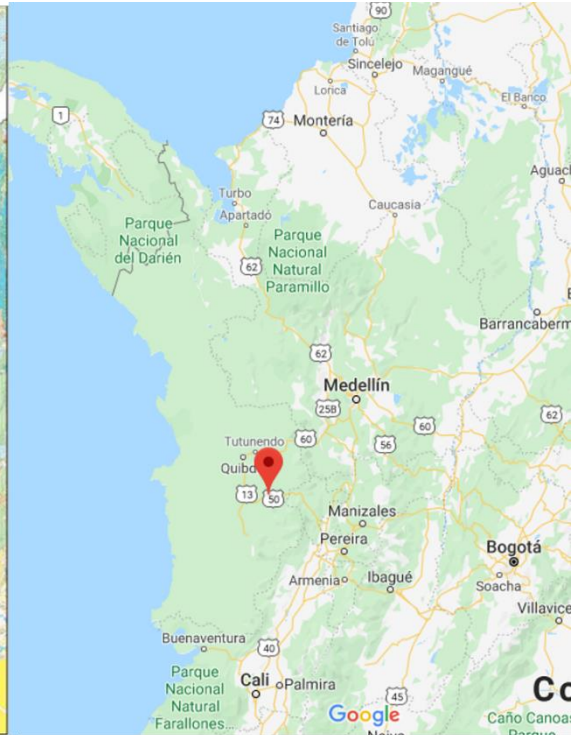


Figura 27. Mapa Geológico Colombiano (2015), Mapa de zonas potenciales para la obtención de Platino, 2011.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano

Figura 28. Indicador Rojo: Corregimiento de Playa de Oro, Chocó.



Fuente: Google Maps.

Las composiciones de Platino presentaron los siguientes valores en porcentaje de peso para las partículas analizadas a continuación:

- **Muestra 1:**

**Partícula 1 (Figura 12):**

**Pt:** 75,29% - **Fe:** 10,65% - **O:** 10,05%

**Partícula 4 (Figura 16):**

**Pt:** 80,54% - **Fe:** 11,63% - **O:** 3,16% - **C:** 3,07%

**Partícula 5 (Figura 18):**

**Pt:** 67,19% - **Fe:** 15,67% - **Cu:** 6,27% - **O:** 5,59%

Para el caso del Platino, todas las partículas presentan impurezas de óxidos de Hierro, y una en particular presenta Cobre, también como impureza. Sin embargo, pese a los rastros de elementos que poseen las partículas de Platino, su composición en el elemento principal es alto y es atractivo para acceder a una obtención en las arenas negras. Hay que recordar que las partículas de Platino presentaron una cantidad considerable y claramente más alta que la del oro en las muestras de Magnetita.

### **5.2.3 ORO**

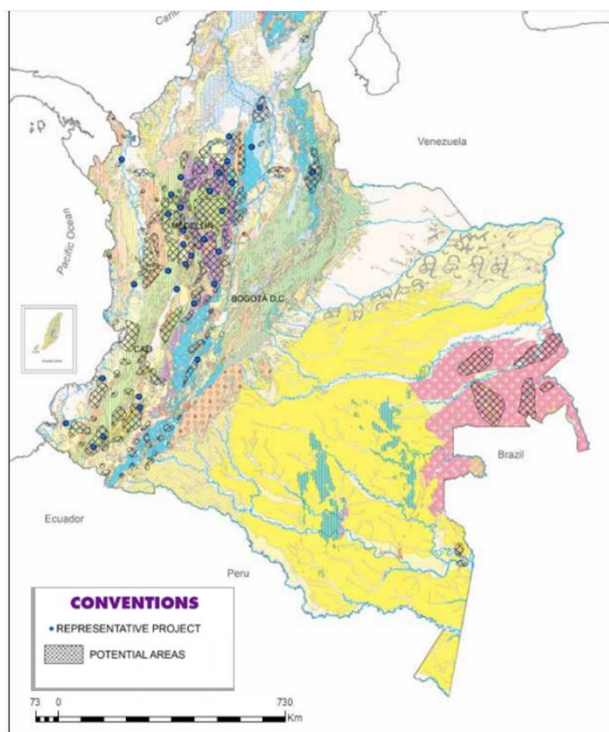
Colombia es el país con más historia de minería y producción de oro en América del Sur. Vuelve a tiempos prehispánicos, cuando este metal se convirtió en el foco de interés por los conquistadores españoles del siglo XVI. Los informes oficiales de producción de oro se remontan hasta 1931, mostrando incrementos significativos en el nivel de oro producción desde los años 80, de 25,7 toneladas en 1985 a 57.15 toneladas en 2014, destacando el pico de producción más alto de 2012 en la historia con 66.178 toneladas. En Colombia, el oro está asociado con diferentes tipos de entornos geológicos, incluida una distribución de ocurrencias en casi todo el territorio. Debido a las condiciones geotectónicas del país, los principales depósitos de oro corresponden a pórfido, epitermal, oro relacionado con intrusiones, oro orogénico, sulfuro masivo volcánico y oro aluvial.

La producción de oro proviene de depósitos encontrados desde siglo veinte. Las compañías mineras transnacionales tienen en desarrollo programas agresivos de exploración y encontraron depósitos importantes, aumentando las inversiones extranjeras para exploración de este metal en Colombia en las dos últimas décadas. [13]

Según el Mapa Geológico Colombiano de Zonas Potenciales para el año 2011 (Obtención de Oro), las áreas y proyectos representativos para la extracción del Oro, coincide con la zona de la mina ‘La Esperanza’ en Playa de Oro, Chocó:

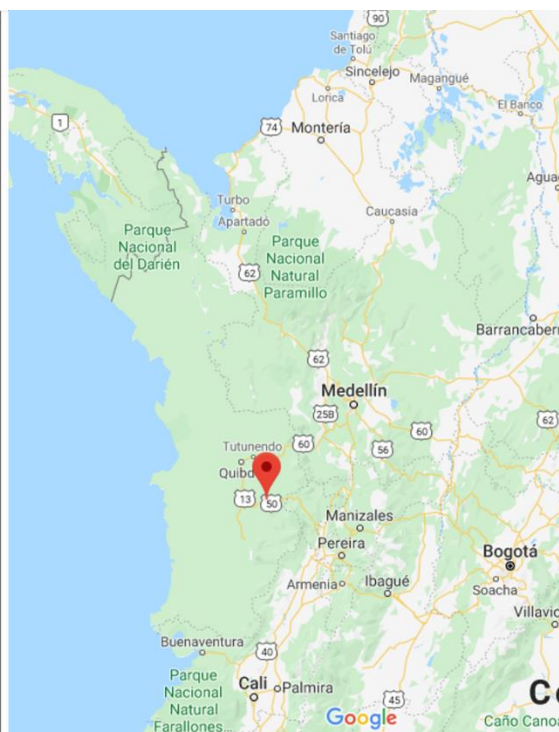


Figura 29. Mapa Geológico Colombiano (2015), Mapa de zonas potenciales para la obtención de Oro, 2011.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano

Figura 28. Indicador Rojo: Corregimiento de Playa de Oro, Chocó.



Fuente: Google Maps.

El Oro hallado en las muestras tiene una interesante composición, además que demuestra que no es un Oro que ha sido amalgamado con Mercurio, ya que los resultados no muestran alguna composición de este elemento. A pesar de que ‘Las Esperanza’ es una mina del tipo aluvión, tiene procesos de obtención del oro muy amigables con el medio ambiente, al tiempo que son artesanales. En la morfología de las partículas de Oro, tampoco presentó patinas de Mercurio, y tampoco el oro se presentó como partícula magnetizada en partículas más grandes de óxidos de hierro, esto quiere decir que la obtención de las partículas que quedaron atrapadas en las muestras de Magnetita tiene de entrada una mayor facilidad de extracción.

Para el aprovechamiento mineral más interesante, se requiere claramente de procesos que faciliten la extracción de partículas de oro de tamaños de aproximadamente desde los 63 hasta los 95 micrómetros, tamaños muy grandes de partícula que demuestra que no ha sido

razonable que, en las arenas negras, se pierdan tales cantidades de oro y se tienen cantidades suficientes para el aprovechamiento de este.

La industria minera, generalmente emplea los procesos de concentración gravimétricos, centrífugos y de flotación por la poca contaminación que generan, los bajos costos de producción y las altas eficiencias de recuperación, donde los equipos comúnmente utilizados son el Jig, las mesas vibratorias, el Knelson, el Falcon y las celdas de flotación. En los procesos anteriormente mencionados, lo que se desea es concentrar el material y posteriormente la separación del oro libre de las arenas negras, en donde el concentrado de arenas negras se limpia para generar arenas blancas o refinadas y someterse a un proceso de separación magnética para la recuperación de minerales. Los minerales finalmente extraídos y separados, tanto los magnéticos, como los no magnéticos, estarán en condiciones apropiadas para ser comercializados. [7]

#### **5.2.4 NANOPARTÍCULAS DE ORO Y SUS APLICACIONES**

Después de la separación de las partículas de oro libre, de la magnetita (arenas negras), se procede a métodos de síntesis para obtener nanoestructuras de oro. Existen varios métodos, tanto físicos como químicos, para el caso de esta investigación es necesario el uso de una molienda mecánica de partículas micrométricas, dado que se tienen tamaños de partículas aún muy grandes y lejanos de ser nanopartículas. La pulverización catódica también constituye otro de los ejemplos de síntesis por método físico.

El procedimiento por seguir, después de los métodos físicos, consiste en métodos contemporáneos con los que hoy día se tratan las nanopartículas de oro: Síntesis de nanomateriales por reacciones químicas entre especies atómicas y moleculares. Con este tipo de síntesis se consigue un gran control tanto de tamaño como de las propiedades de nanopartículas. [3]

Las nanopartículas de oro deben ser de nuevo caracterizadas por los diferentes métodos disponibles, en una extensa investigación para obtener parámetros de:

- Tamaño y distribución
- Morfología
- Carga superficial
- Propiedades intrínsecas
- Composición química y estructural [3]

Para obtener nanosistemas óptimos para distintas aplicaciones biomédicas, es necesario obtener los parámetros anteriores para evaluar la Biocompatibilidad y baja toxicidad de las nanopartículas de oro que se están tratando. [2]

El tema de la biocompatibilidad es bastante amplio, hay un gran número de investigaciones acerca del tamaño de las nanopartículas de oro más idóneo para cada tipo de aplicación, la eliminación natural de las nanopartículas de oro del cuerpo, y las diferentes morfologías que se pretenden obtener para cada tipo de nanopartículas, es decir, nanoesferas, nanocilindros, nanocubiertas, nanojaulas, y un sinfín de temas que aborda el interesante mundo microscópico para el oro. [2]

Como aplicaciones, se pueden encontrar:

- Liberación de fármacos y macromoléculas terapéuticas
- Terapia genética
- Terapia del cáncer
- Entre otros. [2]

## 6. CONCLUSIONES

- La mina ‘La Esperanza’, se encuentra en un punto estratégico y potencial, tanto para la obtención del oro como para la de platino. Esto da un aviso de que una inversión en tecnología, equipo y tecnificación en la zona sería totalmente viable, para adaptar nuevas formas de obtención de metales preciosos a escalas microscópicas.
- Los óxidos de Hierro presentes en las muestras tienen todas las condiciones industriales para intereses económicos y para la venta. Sin embargo, regiones como el Vichada, Guainía y Guaviare, según el sistema de información minero Colombiano, siguen siendo las locaciones donde más hay producción de arenas negras. Estas arenas tienen grandes regalías por parte del Gobierno Colombiano y la región del Chocó posee todas las condiciones para emplear el aprovechamiento de este óxido de Hierro, lastimosamente, la mayoría de las minas presentes del pacífico, son ilegales.
- No se esperaba encontrar partículas de Platino en las muestras tomadas, metal que hoy día, abunda en la región Colombiana y que se presenta en el país de manera abundante, con gran potencial, pero que es poco aprovechado, dadas las condiciones ilegales que enfrenta el país en cuanto a la minería.
- Las partículas de oro presentes pueden tener un gran desarrollo tecnológico y desencadenar en interesantes aplicaciones biomédicas, para la industria de los fármacos y los tratamientos cancerígenos.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Valderrama, J. Chamorro, D. Olguín, J. Rivera and J. Oyarce (2012). *AMALGAMACIÓN DE CONCENTRADO DE ORO OBTENIDO EN CONCENTRADOR KNELSON*. Ingeniería. Departamento de Metalurgia, Universidad de Atacama, Copiapó, Chile.
- [2] AL-QADI, S. and REMUÑÁN, C. (n.d.). *Nanopartículas metálicas: oro*. Ingeniería. Departamento de Farmacia y Tecnología Farmacéutica. Facultad de Farmacia. Universidad de Santiago de Compostela.
- [3] Mansukhani Chetwani, D. (2015). *Síntesis, modificación superficial y caracterización de nanopartículas de oro*. Maestría. Universidad de Oviedo, Ciencias Analíticas y Bioanalíticas.
- [4] Ruiz Briones, P. (n.d.). *Nanopartículas magnéticas para tratamiento y diagnóstico de cáncer*. Farmacia. Universidad Complutense, Facultad de Farmacia.
- [5] Echevarria García, N. (2015). *Síntesis y caracterización de nanopartículas de oro*. Grado en Química. Universidad del País Vasco, Departamento de física, Departamento de Química Inorgánica.
- [6] Kerguelen Bendeck, J. (2016). *Caracterización y Aprovechamiento de Recursos Minerales en Colas de Terrazas Aluviales del Distrito Bagre-Nechí*. Máster Recursos Minerales. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería de Materiales.
- [7] Rojas Reyes, N., Quitian Chila, G. and Saldarriaga Agudelo, W. (2017). Caracterización Magneto-reológica de un Fluido a Base de Desechos Mineros. *Ciencia en Desarrollo*, 8(2), pp.61-67.
- [8] Fernández Cabada, T. (2014). “Caracterización de nanopartículas magnéticas y de oro para posibles aplicaciones biomédicas en diagnóstico y terapia.” *Universidad Politécnica de Madrid*, 1–236.
- [9] Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito. (2016). *Explotación de oro de aluvión*.
- [10] Investigaciones.uniandes.edu.co. (2019). *Microscopía de Barrido de Electrones (MEB) – Vicerrectoría de Investigaciones*. [online] Available at: <https://investigaciones.uniandes.edu.co/microscopio-electronico-de-barrido-meb/> [Accessed 22 Oct. 2019].

[11] Magnetita - EcuRed. (2011). Retrieved 16 January 2020, from <https://www.ecured.cu/Magnetita>

[12] NATIONAL MINING AGENCY, 2015. National Mineral Production 2014 In <http://www.anm.gov.co/?q=regalias-contraprestaciones-economicas>  
<http://historiacritica.uniandes.edu.co/view.php/622/index.php?id=622> U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2013

[13] NATIONAL MINING AGENCY, 2015. National Mineral Production 2014. In <http://www.anm.gov.co/?q=regalias-contraprestaciones-economicas>  
<http://www.anglogoldashanti.com.co/saladeprensa/Libros/ELORO.compressed.pdf>  
<http://www.simco.gov.co/simco/Estad%EDsticas/Producci%F3n/tabid/121/Default.aspx>